

초음파에 의한 액체 미립화 특성에 관한 연구

A Study on Characteristics of the Liquid Atomization by Ultrasonic

주 은 선*, 나 우 정**, 최 우 창***
Eunsun Ju, Woojung La, Woochang Choi

ABSTRACT

A good atomization in uniform size brings the elevation of thermal efficiency in spray combustion, the beautiful painting on surfaces, and the economical sprinkling of chemicals. Ultrasonic atomization has been expected as a good uniform atomization mechanism due to its uniform size distribution. Influx, load, and physical properties of liquids are the effecting factors to atomize liquids. In this study, distilled water and city water are selected as reference liquids and gasoline, kerosene, and petroleum as fuel liquids. Characteristics and affinity to get the maximum effect for the ultrasonic atomization are observed by using the two ultrasonic transducers with 28kHz and 2MHz. Results show that the size distributions of liquid spray droplet by the direct vibration method prevail over those by the aerosol method in uniform droplet size and as a whole, sizes of spray liquid droplets are increased slightly according to increasing influx in the direct vibration method and quantities of spray droplets in the aerosol method decreasing according to increasing liquid load h.

주요기술용어 : Ultrasonic Atomization(초음파 미립화), Direct Vibration Method(직진법) Aerosol(무화), PZT BLT(PZT 볼트 체결형 램지방 변환기), Resonance(공진), Affinity(친화성)

1. 서 론

열원을 얻는 공장, 가정용 보일러에서, 동력을

얻는 가솔린, 디젤, 가스터빈등 열기관에 이르기 까지 분무연소가 지배적이다. 이들 연소기에서 액체 연료의 분무미립화는 에너지원 절감과 공해 가스 저감등을 가져오는 열효율 향상에 직결되는 핵심 과제로서, 양질의 미립화를 위한 연구가 꾸준히 계속되고 있다.

초음파 분무는 균일입경의 분포가 우세한 장점으로 양질의 미립화기구로 기대되며, 그리고 낮

* 정회원, 경상대학교 항공기계공학과
** 경상대학교 농업기계공학과
*** 경상대학교 대학원

은 유속과 낮은 공급유량에서 사용될 수 있다는 장점때문에 반도체 공정기기, 가습장치, 의약품제조 도포공정등 그 응용범위가 확대되고 있다.¹⁾

초음파 미립화 방법으로는 초음파 진동자 표면에서 초음파의 직접적인 진동에 의한 액적의 미립화방법(이하 직진법)과 초음파 에너지가 액체를 통과하여 액체 표면에서 미립화가 일어나는 무화 현상(이하 무화법)등이 있다.²⁾

직진법은 초음파 진동에 의한 액적의 불안정성 극대화로 야기되는 액막, 액사, 액적등의 과정을 거쳐 미립화가 일어나며, 유량이 미립화 액적입경에 영향을 끼치는 것으로 보고되고 있다.

전형적인 초음파 노즐연구로는 Mochida³⁾와 Berger⁴⁾등의 보고가 있다. Hiroyasu⁵⁾등은 초음파 분무공에 대해, Nakayama⁶⁾등은 초음파에 의한 균일액적 생성기구에 대해, 기타 많은 연구가 있다.

초음파가 액체에 가해지면 액체 분자의 분산작용, 공동현상, 절도 및 비중저하, 분자구조변화⁷⁾, 분자량의 저하 및 산화작용등 물리적, 화학적 물성변화가 일어나는데, 이에 의해 강화되는 액체 미립화 친화성등은 무화법에 관계된다.

류⁸⁾, 조⁹⁾ 등은 가솔린 기관에서, 양¹⁰⁾, 윤¹¹⁾ 등은 디젤 기관에서, 그 외 많은 연구자들은 나뭇데로의 실험 장치에서, 초음파에 의한 액체미립화 효과검증등을 기관의 성능향상이나 오염가스 저감등을 통한 거시적 관찰에서 찾았다.

초음파 효율극대화를 위해서는 공진을 이용해야 하며, 여기에는 발전자, 진동자, horn등 부착 부품등이 관련된다. 특히 액체 미립화 친화성에는 액체 물성 및 부하등 물리적 조건 등이 관련되며, 여기에 대한 미시적 관찰보고는 미미한 상태이다.

본 연구에서는 기준액체로서 증류수와 수도물을, 연료액체로는 휘발유, 등유, 석유등을 택하고, 초음파 장치로는 28kHz저주파 및 2MHz고주파 진동자를 사용하여 유량과 액체 부하에 따른 초음파 분무실험을 하고, 상대적으로 비교 관찰하므로써 초음파에 의한 액체의 분무·친화 특성등

에 관한 기초자료를 얻고자 했다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1 초음파 실험장치

초음파 진동에 의한 진동자 표면에서의 미립화, 즉 직진법에서 유량과 분무액적 입경과의 관계를 여러 액체에 대해 관찰하기 위한 실험장치를 Fig.1에서 볼 수 있다.

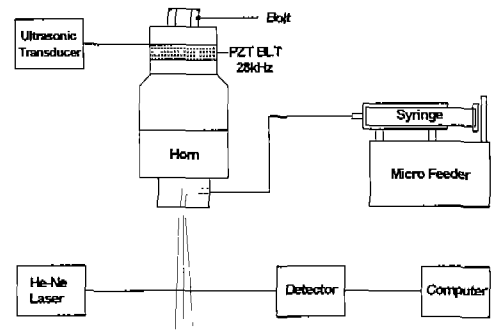


Fig.1 Experimental equipment for the ultrasonic atomization by the direct vibration method of PZT BLT

28kHz저주파인 PZT볼트 체결형 랑지방 초음파 변환기에 horn을 부착하고 horn 중앙에 hole nozzle을 만들고 액체가 유입되는 옆구멍과 통하게 하였다. Table 1에서 PZT BLT의 사양을 볼 수 있다. 정확한 유량주입을 위해서 Micro feeder를 사용하였다.

주입 유량은 0.5, 1, 1.5, 2, 2.4 ml/min으로 하였다.

Table 1 Specification of 28kHz PZT BLT

Frequency (kHz)	Admittance (mΩ)	Thermal Quality (Qm)	Capacity (pF)
28±0.4	35±7	1,000	3000±15%
Maximum Velocity (cm/s)	Maximum Altitude (μm)	Dia. & Thickness (mm)	Parts (ca)
60	96	∅29.5, 5	2

Fig.2는 액체부하, 즉 진동자 두면상(頭面上)과 일정한 액면과의 수두 h, 즉 액체부하에 따른 무화특성을 관찰하기 위해 진동자를 유연하게 내장한 아크릴 원통을 그 주위에 piston테를 만들어 진동자 두면상의 액체가 누설되지 않도록 실린더에 삽입한 무화실험 장치이다. 무화액적 수송을 위한 압축공기압은 0.5kgf/cm^2 로 하였다.

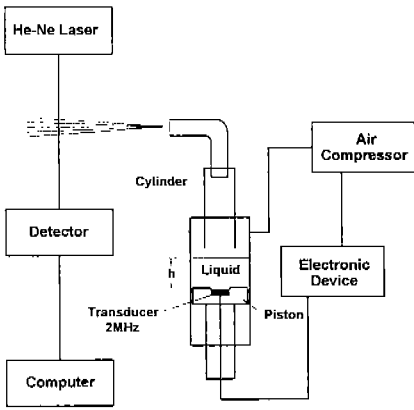


Fig.2 Experimental equipment of the aerosol method with the variable liquid load (head:h) device constructed by the cylinder and piston

2.2 입경 측정장치

분무입경은 광산란측정법으로서 Fraunhofer 회절원리를 이용한 Malvern system을 사용하여 측정하였다. Fraunhofer 회절원리는 Fig.3에서 그 원리도를 볼 수 있다.

회절 산란 광의 광도 분포는

$$I(\omega) = I_0 \left\{ \frac{2 J_1(kd\omega)}{kd\omega} \right\}^2$$

으로 주어지며, 여기서 $I_0 = \frac{EA}{\lambda^2}$, $\omega = \frac{r}{f}$

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ 이고 J_1 은 1종1차 베셀함수, λ 는 레이저 광의 파장, A는 입자의 단면적이다.

초점면상에서 $r = r_0$ 까지 (즉 $\omega = \omega_0$ 까지)의 누적 광량분율의 분포는 베셀함수의 특성을 이용하고 정리하므로써

$$L(\omega_0) = 1 - J_0^2(kd\omega_0) - J_1^2(kd\omega_0)$$

로 되고 ω_0 에 관하여 미분하므로 입자입경에 대한 식

$$d = \frac{1.375\lambda f}{2\pi r_{opt}}$$

를 얻을 수 있다.

여기서 r_{opt} 는 최적 반경이다. 이 원리에 의해 Malvern 입경 측정 장치가 구성되었다.

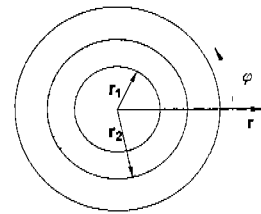
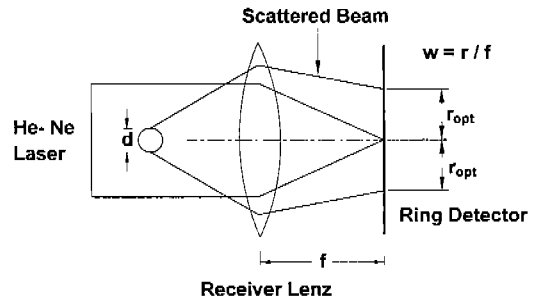


Fig.3 Principle diagram of the light scattering method for particle size analyzer

분무입경 측정에 사용된 광원은 He-Ne 레이저 ($2mW, \lambda = 633nm$)를 사용하였고, 빔 확장기는 9mm이다. 푸리에 변환 렌즈의 초점 거리는 300mm이고, 렌즈와 분무노즐 중심까지의 거리는 350mm로 하였으며, 사용렌즈의 분무입경 측정범위는 $1.2 \sim 188\mu m$ 로 하였다.

분무입경의 측정값은 한번 측정에 있어서 2000data를 sampling하여 5회 측정하여 평균한 SMD값이다.

SMD를 기본이론에서 살펴보면 평균직경에 대한 적분형의 식은

$$(D_{ab})^{a-b} = \frac{\int_{D_o}^{D_m} D^a \left(\frac{dN}{dD}\right) dD}{\int_{D_o}^{D_m} D^b \left(\frac{dN}{dD}\right) dD}$$

로 주어지는데, 여기서 a=3, b=2 즉 order 5일 때 액적범위, 질량전환, 열전달 등에 응용되는 SMD(Sauter mean diameter)는 다음과 같이 정해진다.

$$D_{32} = \frac{\sum N_i D_i^3}{\sum N_i D_i^2}$$

여기서 N_i 는 입자의 입경의 개수이고 D_i 는 입자의 입경이다.

2-3 분무량 측정장치

무화장치에서 액체부하, 즉 수두 h에 따른 분무액적의 분무량을 측정하기 위해 무화 분무장치에 solenoid valve, speed valve 및 전자 timer를 장착하여 오실로스코프와 computer controller에 의해 간헐적 분무를 가능케 하도록 하였다.

초음파 무화법에 의한 분무량은 최대 압축공기로 출발하여서 정해진 회수 간격에서 3번 분무한 것을 획득 장치에 의해 얇은 비닐 봉지에 수집하여 공기를 뺀 액적의 분무중량을 1×10^{-4} g 감도를 가진 초감도 전자저울로 매회 3번씩 측정하여 평균하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 액체 물성 실험

액체 미립화 친화성에 관련되는 액체 물성에 관한 기초자료를 얻고자 실험대상으로 기준액체로서는 증류수 및 수도물을, 연료 액체로서는 휘발유, 등유 및 석유등을 택했다. 그들 각각의 비중, 점성, 표면장력 등을 조사하여 그 결과를 표1에 나타내었다. 비중은 정밀 표준 비중계를 사용하였고 KS M 2003환산표에 따라 온도에 따른

환산을 하였고, 그 기본식은 다음과 같다.

$$S = M [1 + 0.000025(15 - t_1)]$$

점성은 Brookfield digital viscometer Model DV-11t를 사용하여 측정하였다. 표면장력은 쥘메이씨 표면장력계를 사용하여 측정하였고, 그 기본식은

$$T = W / 2\pi (r_1 + r_2)$$

로 주어진다.

Table 2에서 온도 26°C일 때 비중은 물, 즉 증류수와 수도물이 가장 크고 석유, 등유, 휘발유 순으로 나타나고 있다. 점성은 크기가 석유, 등유, 증류수와 수도물, 휘발유 순이다. 표면장력은 수도물, 증류수, 석유, 등유, 휘발유 순이다.

Table 2 Physical properties of spray liquids

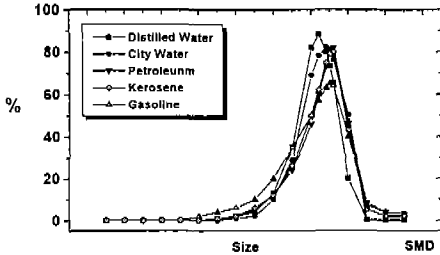
Liquids Physical properties	Distilled water	City water	Gasoline	Kerosene	Petroleum
Sp gr (26° /4°C)	0.997	0.997	0.7417	0.787	0.8307
Viscosity (26°C, cP)	0.875	0.875	0.5328	1.3773	3.32
Surface Tension (dyne/cm, 26°C)	72.07	78.61	27.72	32.57	35.34

3-2 분무입경 분포도

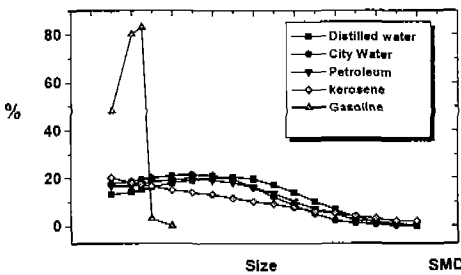
Fig.4는 광산란 입경측정장치인 Malvern system을 사용하여 얻어진 입경 분포도이다. (a)는 직진법에 의해 나타난 액체들의 입경분포선들을 비교하고 있다. (b)는 무화법에 의해 나타난 여러 액체의 입경 분포도의 비교이다.

(a)와 (b)를 비교하면 직진법에 의한 입경분포도가 무화법에 비해 입경의 균일성이 현저하게 나타났음을 볼 수 있다. (a)에서 휘발유의 균일 입경분포도가 가장 낮은 것은 기화 친화성 때문으로 해석된다. (b)에서 무화법에 의한 4액체의 입경분포도는 입경크기의 넓은 분포를 보이고 있

으나, 휘발유는 (a)에서와 같이 균일입경분포가 현저히 나타나고 있다. 이는 휘발유의 높은 기화 친화성을 말해주고 있다. 등유의 입경 분포선은 거의 직선 적으로 나타나 그 특색을 보이고 있다.



(a) Direct vibration method

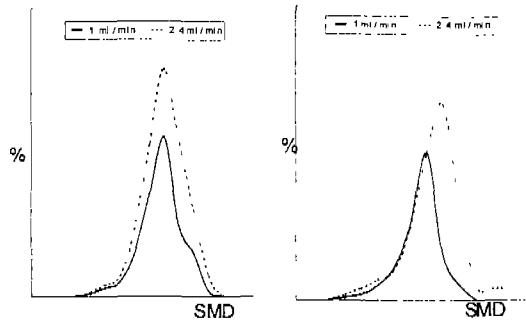


(b) Aerosol method

Fig.4 Comparison of size distributions of spray droplets

Fig. 5는 직진법에서 주입량에 의한 입경 분포를 비교하고 있다. a)와 b)모두에서 실선은 유입량이 1ml/min, 점선은 2.4ml/min일 때의 입경 분포도로서 a)는 증류수, b)는 휘발유에 관한 것이다. 입경 크기의 범위는 비슷하면서 유입량을 클 때 분포율(%)은 a), b)모두에서 커짐을 볼 수 있다.

Fig.6은 무화법에서 수두 h에 의한 입경 분포를 비교하고 있다. a)는 수도물로서 실선은 h=1cm, 점선은 h=7cm일때의 입경분포선을 보이고 있다.

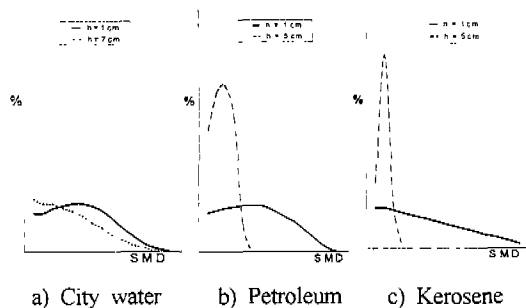


a) Distilled water

b) Gasoline

Fig.5 Comparison of size distributions according to SMD by influx in the direct vibration method

액체 부하, 즉 수두 h가 작을 때보다 클 때가 입경 분포선이 거의 직선적으로 감소함을 볼 수 있다. 이는 h=7cm 때는 초음파에 의한 분무가 극히 작아진 때문인 것으로 해석된다. b)와 c)에서 실선은 h=1cm, 점선은 h=5cm일때의 입경 분포선을 나타내며, b)는 석유, c)는 등유에 관한 것으로서 수두 h가 클 때 입경 분포선의 입경크기 범위가 극히 좁아지고 있는데 이는 액체 부하가 클 때는 초음파에 의한 캐비테이션 현상보다는 기화 현상이 우세한 것으로 해석된다.



a) City water

b) Petroleum

c) Kerosene

Fig.6 Comparison of size distributions according to SMD by head h in the aerosol method

3-3 입경 측정

Fig.7은 직진법에서 실험액체들의 유량 0.5, 1, 1.5, 2, 2.4 ml/min에 따른 입경의 변화에 대한

그래프이다. 5종류 액체 모두가 유입유량이 커짐에 따라 입경이 조금씩 커지는 경향을 볼 수 있다. 석유의 평균분무 입경이 가장 크게 나타났으며, 그 다음으로 수도물, 증류수, 등유, 휘발유 순으로 나타났다. 증류수와 수도물 사이에서 수도물의 분무액적 입경이 증류수 분무액적 입경보다 큰 것은 비슷한 점성에서 표면장력이 수도물이 증류수보다 크므로 여기서는 표면장력이 미립화 친화성을 억제하는 우월 요소로 나타나고 있다. 3연료 액체에서는 점성이 미립화 친화성을 억제하는 우월 요소로 나타나고 있다. 석유가 물에 비해 표면장력은 작으면서 분무입경이 크게 나타난 것은 석유의 점성이 물의 점성보다 큰 것으로 보아 액체의 점성이 표면장력보다 미립화에 더 큰 저항 요소임을 알 수 있다.

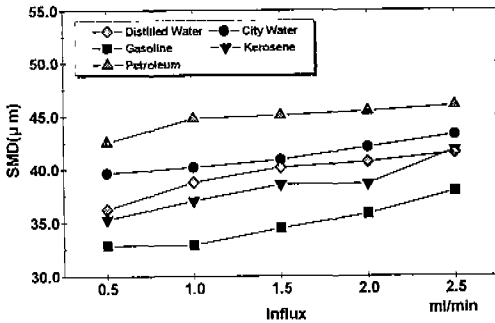


Fig.7 Comparison of spray droplet sizes of liquids in accordance with influx

Fig.8은 상기 각 액체들의 모든 유량에 따른 평균 분무입경의 크기를 비교한 그래프이다.

주정(柱頂)을 이은 실선은 물성표에서 나타난 비중, 표면장력 및 점성등을 액체를 따라 크기순으로 나타낸 선들과 비교할 때 표면장력의 크기선 보다는 점성의 크기선에 비슷한 따름을 보여주고 있다. 이는 점성이 미립화에 큰 저항요소임을 보여주는 것으로 해석된다.

Fig.9는 무화법에 의하여 나타난 각 액체의 분무입경의 크기를 액체 부하, 즉 진동자 면과 액면

과의 수두 h에 따라 비교한 그래프이다.

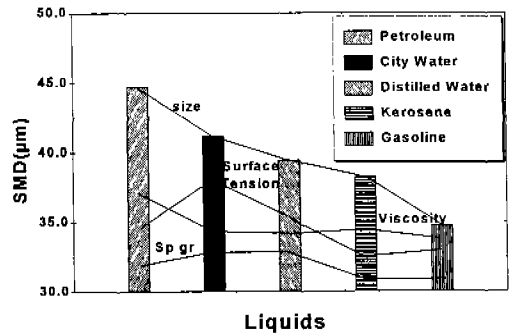


Fig.8 Comparison of average sizes of spray liquid droplets

전반적으로 액체 부하, 즉 수두 h가 클수록 분무입경이 작게 나타났으나, 수도물인 경우 h=5, 6cm에서 입경이 조금 더 크게 나타난 것은 더 상세한 관찰을 요한다.

직진법, 즉 진동자 표면상의 초음파 진동에 의한 분무입경 크기 비교에서는 석유 입경이 가장 크게 나타났으나, 무화법에서는 증류수의 입경이 제일 크게 나타났다. 이는 증류수에서는 용존 기체의 배제로 인한 캐비테이션의 영향이 대단히 적기 때문으로 풀이된다. 직진법과 무화법에서 나타난 입경의 크기 비는 직진법일때가 무화법일 때보다 최소한 10배이상으로 입경이 크게 나타났다.

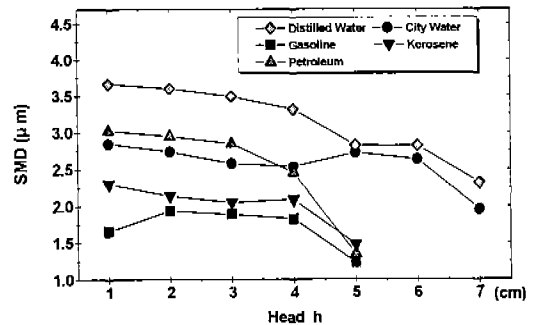


Fig.9 Comparison of spray droplet sizes of liquids in accordance with head h

휘발유가 $h=1\text{cm}$ 일 때 다른 액체에 비해서 입경이 작게 나타난 것은 온도 상승에 의한 기화친화성 때문인 것으로 해석된다.

Fig.10은 상기 무화법에서 수두 $h=1\text{cm}$ 에서 5cm까지의 액체의 분무 입경의 크기를 평균하여 비교한 그래프이다.

입경의 크기 순으로는 증류수, 수도물, 석유, 등유, 휘발유 순으로 나타나고 있다. 평균크기 순서에 따른 주정(柱頂)을 이은 실선에 점성, 표면장력, 비중순 모두가 연관성 적게 산만하게 나타나고 있다. 이는 무화법에서는 초음파가 액체속을 통과하므로 용존기체에 의한 캐비테이션현상등 액체물성에 많은 변화를 가져와 입경 미립화에 복잡한 영향인자들이 많이 발생했음을 보여준다.

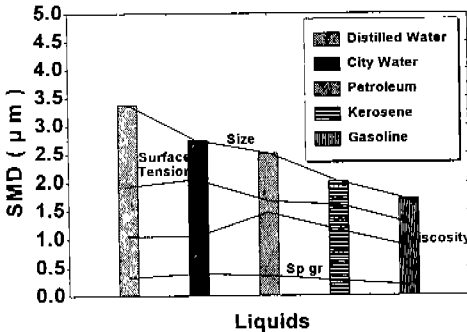


Fig.10 Comparison of average sizes of spray liquid droplets

3-4 분무량 측정

Fig.11은 수두 h 에 따른 각 액체들의 무화에 의한 분무량을 비교한 그래프이다. 증류수와 수도물은 $h=3\text{cm}$ 일 때 분무량이 가장 많고 모든 수두 h 에서 수도물이 증류수보다 분무량이 많게 나타나고 있다. 이는 수도물의 용존 기체에 의한 캐비테이션 현상의 영향으로 생각된다.

연료액체에서는 대체적으로 수두 h 의 증가에 따라 분무량이 감소하는 것으로 나타났으며 휘발유가 가장 분무량이 많게 나타나고 있다. 연료액체의 최대 분무량은 $h=1\text{cm}$ 일 때로서 2 종류의

물의 최대 분무량이 $h=3\text{cm}$ 일 때와는 대조적으로 나타나고 있다. 그 원인에 대해서는 액체물성에 대한 더 미시적인 실험이 요구된다.

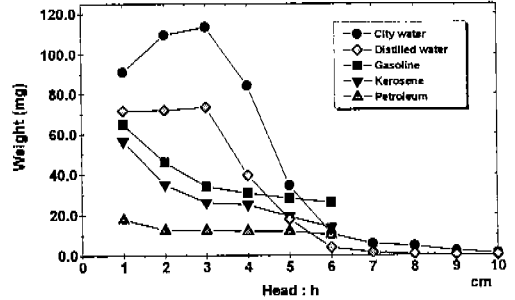


Fig.11 Comparison of spray quantities of liquids in accordance with head h

Fig.12는 각 액체들의 수두 $h=1\text{cm}$ 에서 6cm까지의 평균분무량을 양이 많은 순서대로 배열한 그래프이다.

상기 Fig.11에서와 같이 수도물, 증류수, 휘발유, 등유, 석유의 순으로 나타났으며 여기에서 점성이 가장 큰 석유가 분무량이 가장 작게 나타나고 3연료 액체 분무량의 히스토그램의 정점을 이은선과 점성 연결선이 반대로 나타난 것은 연료액체의 분무량에서 점성이 가장 큰 저항요소임을 의미하는 것으로 사료된다.

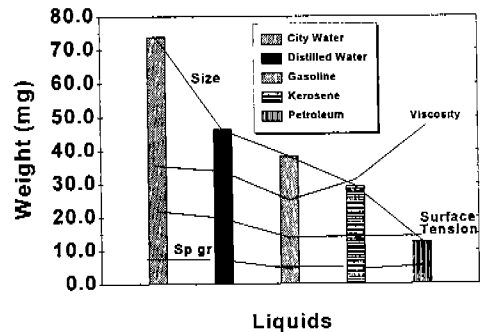


Fig.12 Comparison of mean spray quantities of liquids

Fig.13 은 무화법에서 증류수와 수도물의 액체

부하, 즉 수두 h 에 따른 분무액적 평균 입경크기와 평균 분무량의 관계를 보이는데, 입경 크기 눈금(SMD: μm)은 왼쪽, 분무액적량눈금 (mg)은 오른쪽에 나타내고, 동그라미 표는 증류수, 삼각표는 수도물, 검은색은 입경, 흰색은 분무량을 나타내고 있다.

수도물이 증류수에 비해 분무입경은 작으면서 분무량이 많은 것을 보이고 있다. 이것은 수도물이 상대적으로 많이 가지고 있는 용존 기체에 의한 미립화 친화적인 캐비테이션 현상에 의한 것으로 해석된다.

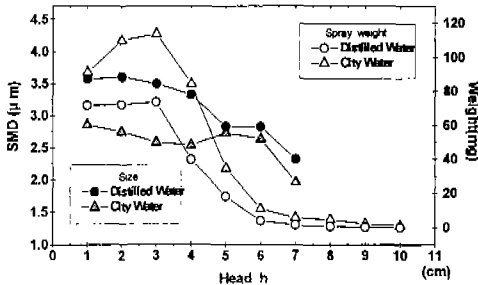


Fig.13 Comparison of sizes and quantities of spray droplets between distilled water and city water in the aerosol method

4. 결 론

초음파에 의한 액체미립화의 효율향상을 위한 더 근원적이고, 미시적인 기초자료를 얻기 위해 기준액체로는 증류수와 수도물을, 연료액체로는 휘발유, 등유, 석유를 택하여, 유량과 수두변화에 따른 초음파 액체 미립화 특성 등을 관찰한 결과는 다음과 같다.

1. 입경분포도에서 직진법에 의한 분무가 무화법에 비해서 균일 입경분포가 단연 우세하게 나타났다. 그 중에서 휘발유의 균일입경분포도가 가장 낮은 것은 강한 기화 친화성 때문인 것으로 해석된다.

2. 분무입경 측정에서 직진법에서는 전반적으로 입경의 크기가 유량에 영향을 받으며, 분무입경의 크기는 석유, 수도물, 증류수, 등유, 휘발유 순으로 나타났다. 3연료액체의 입경 크기 순서가 점성의 크기순과 같은 점성이 연료액체의 미립화에 저항요소임을 나타낸다. 무화법에서는 입경 크기 순서가 증류수, 수도물, 석유, 등유, 휘발유 순으로 나타났다. 수두가 작아짐에 따라 전반적으로 분무입경이 다소 크게 나타났는데 휘발유만은 작은 수두에서 입경이 작게 나타난 것은 기화친화성을 보인 것으로 해석된다. 직진 분무입경이 무화 입경에 비해 최소한 10배 이상의 크기의 범위를 보이고 있다.

3. 분무량 측정에서 분무량이 많은 량 순서에서 수도물, 증류수, 휘발유, 등유, 석유 순으로 나타났는데 수도물이 가장 분무량이 많은 것은 용존 기체로 인한 캐비테이션 친화성 때문인 것으로 해석된다. 3연료 액체는 수두 h 가 커짐에 따라 다소 하향선을 보이는데 비해 수도물과 증류수는 $h=2, 3\text{cm}$ 에서 분무량이 커졌음은 액체 부하의 공진 현상과 관계되는 것으로 추론되며 여기에 대한 더욱 미시적인 관찰이 요구된다. 3연료 액체의 많은 분무량의 순서가 점성 크기 순서와는 반대인 것으로 보아 점성은 연료액체의 분무량에 최대 억제 요소임을 보여준다.

4. 수도물이 증류수에 비해 분무입경이 작으면서 분무량이 많은 것은 수도물이 상대적으로 많이 가지고 있는 용존기체에 의한 캐비테이션현상때문인 것으로 사료된다.

후 기

이 논문은 1997년도 한국 학술진흥재단의 공모과제(과제번호 : 1997-001-E00017)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이상용, "액체의 미립화", 1996, (주)민음사
2. 藤森 聰雄, "やさしい超音波 應用, 東京大學 生産技術研究所, 産報 出版.
3. Mochida T., "Ultrasonic Atomization of Liquids", Proc. 1st International Conference on Liquid Atomization and Sprays (ICLASS-78), pp. 193-200, 1978.
4. Berger, H. L., "Characterization of a Class of Widely Applicable Ultrasonic Nozzles", Proc. 3rd International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems (ICLASS-85), pp. 1A/2/1-1A/2/13, 1985.
5. 廣安博之의 2인, "超音波噴射弁に関する研究", 日本機械學會論文集(B), 51卷, 475号, 1985.
6. M. Nakayama, "Study of Uniform-size Liquid Droplet Formation by Ultrasonic Vibration", JSME(B), 52, 482, 1986.
7. Laljt Dixit, Hydrocarbon Type Distribution and Structural Parameters of Gasolines by HNMR and IR Spectroscopy", Indian Journal of Technology, Vol. 23, pp.315-317, 1985.
8. 류정인, 초음파를 이용한 흡인 연료의 미립화 성능에 관한 연구, 충남대 산업기술연구소 논문집 제2권 제1호, pp. 46-54, 1987.
9. 조규상, 이성래, 최두석, 류정인, "가솔린 기관용 초음파 미립화 장치의 타당성에 관한 연구 (I)", 자동차 공학회지, Vol. 9 NO.4, pp.41-49, 1987.
10. 양정규, 최두석, 윤진한, 류정인, 초음파 연료 공급장치를 이용한 디젤기관의 성능향상에 관한 연구(II)", 한국자동차공학회 1993년도 춘계학술대회 논문 8-4, pp. 583-588, 1993.
11. 윤면근, 류정인, "초음파 연료 분사장치의 분무특성에 관한 연구", 한국액체미립화 학회지 1(1), pp.85-91, 1996.